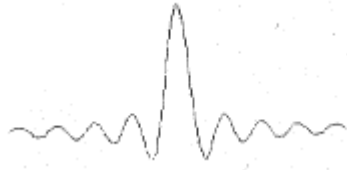


"Sincen", nyckeln till CD-ekvationens lösning



Nu när spikfötter, biwiring, interconnection kablar, de olika länkarnas betydelse i återgivningskedjan, pickupens och tonarmens geometri samt vetenskapliga testmetoder och mycket annat avhandlats står så äntligen CD-systemet på tur. Detta har anklagats för att vara jämförbart med hamburgare eller hackad biff av okunniga antagonister, mindre bekymrade om sanningen. Denna artikel skall försöka belysa orsakerna till att så inte är fallet. Ämnets komplexitet gör dock att artikeln måste hamna på en lite högre nivå än vad som kan förstås av alla. Artikelförfattaren uppmanar dock alla läsare att försöka förstå så mycket som möjligt.

För att öka begripligheten i denna artikel ska jag försöka fatta mig ovanligt kort. Artikeln skall endast behandla två fenomen, nämligen CD-systemets amplitudegenskaper och dess tidsegenskaper. Förhoppningsvis ska jag kunna avstå från alltför stora utsvävningar från dessa båda ämnen.

KORT OM TIDEN

I tid och otid har man hört många märkligheter, som t.ex. att alla detaljer i musiken återgivet över en CD-platta skulle vara tvungna att inträffa exakt på någon av de samples som tages 44 100 ggr per sekund. Detta då till skillnad från verkligheten, där detaljerna kan inträffa precis när som helst, liksom som på en vinyiskiva.

Att denna missuppfattning kunnat spridas är kanske inte så konstigt då flertalet vanliga konsumenter via rektambroschyrer överöses med halvsanningar om hur CD-systemet är uppbyggt. Utan hela sanningen är det dock i allmänhet svårt att bilda sig korrekta uppfattningar om hur någonting fungerar, i det här fallet om detaljåtergivningspotentialen, hos CD-systemet.

Nu kan man ju fråga sig vad en detalj innebär rent tekniskt, men oavsett vad det innebär så är sanningen den att en detalj (t.ex. en flank från en trumma, se fig 1) kan inträffa precis när som helst, på eller emellan sampels. Hur det kan vara möjligt skall förklaras senare i artikeln.

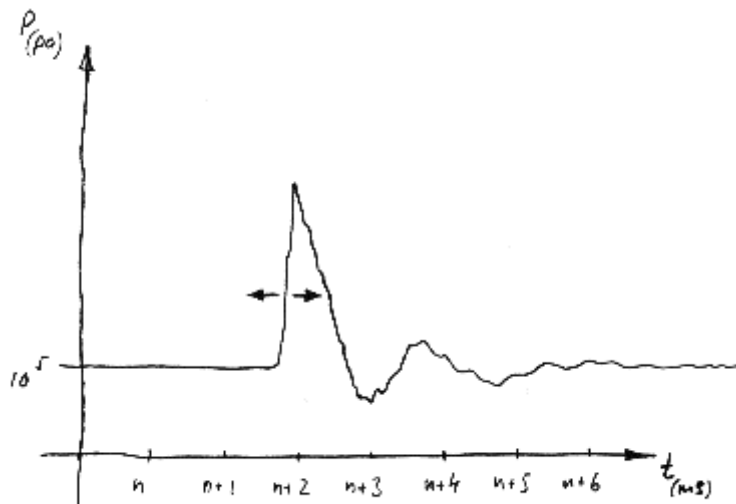


Fig. 1

KORT OM AMPLITUDEN

På olika nivåer i audiovärlden diskuteras amplitudproblem i CD-spelare. Man måste då skilja på **apparatproblem** och **systemfel**, två helt skilda saker som tyvärr jämt och ständigt blandas ihop i debatten. Att enskilda apparater kan lämna en del övrigt att önska är ju ett problem för konsumenten, men debatten om **CD-systemets** vara eller icke vara har inget att göra med enskilda tillverkares försök. Vad som gäller för CD-systemet är att de amplitudegenskaper som syns i trappstegskaraktären hos överföringsfunktionen faktiskt inte behöver ge ett amplituddiskret system! Tvärtom kan hur små signaler som helst kodas om ett blaserade brus är tillstådes under kvantifieringen (även om det självklart blir svårare och svårare att höra eller mäta signalerna ju längre under bruset de ligger, precis som i ett analogt lagringssystem .

I både tids- och amplitudfrågan råder dock stor okunnighet. Tyvärr tycks inte heller vissa av dem som saknar kunskap kunna avhålla sig från att försöka sprida sina missuppfattningar. Senast kunde man t.ex. i vår egen MoLt (nr I -91) läsa:

'Det är alltså ett par grundläggande fel på den digitala tekniken, det man framför allt märker som tränad lyssnare är två saker, för det första är ettorna och nollorna för glesa, dvs du missar mängder med detaljinformation som ger levandekänsla, som ger små akustiska förlopp. Detta beror på att trappstegen är för grova. Det andra är att det digitala systemet har en distorsion som schematiskt sett är konstant oavsett ljudstyrka. Det gör att när du har väldigt svaga signalnivåer så är ljudförvrängningen väldigt hög. En normal CD-spelare har, innan den slår ifrån när du närmar dig tystnad, 30% förvrängning. Detta är kalla fakta. Tystnaden du har i det digitala systemet är falsk, därför att du har 40% ljudförvrängning av tystnaden..... CD-mediet har förfinats inom de ramar som finns, men dessa är otillräckliga för dem som tycker om oxfilé. " slut citat.

Det är en klen ursäkt att den som här citeras gör en skaplig vinylspelare.

(att sen den citerade artikelns författare mot sitt nekande visat sig vara kollega med "intervjuoffret" (dvs den som uttalar sig) är givetvis också generande)

NÅGRA KOMMENTARER OM SVAMLET

Ska man säga något kort om det citerade får det väl bli att det alltid är bättre att taga reda på fakta innan man börjar föreläsa.

Ska man säga något lite längre så börjar jag *med att* en normal CD-spelare inte *slår* ifrån när signalen närmar sig tystnad. Vidare har den inte 30% distorsion då det *är* nästan tyst förutsatt att den kodade informationen är försedd med ditherbrus (eller mikrofonbrus eller något annat brus). Dessutom kan man fråga sig vad 40% distorsion av tystnaden betyder. Kan det möjligen innebära att distorsionskomponenternas storlek är 40% av tystnadens storlek, dvs det finns ingen distorsion alls? Kalla fakta är att det är fullt möjligt att hålla den signalrelaterade distorsionen långt under 1% vid signaler nedåt -90 dB! Då talar vi alltså om distorsionskomponenter som ligger nere på -130 dB eller bättre! (alltså bättre än 22 bitars upplösning)

De signaloberoende distorsionskomponenterna dvs brus och dylikt kan hållas nere vid ca -95 dB. Även om det kanske inte är känt för alla vad det beror på att det är på det här sättet, så borde det vara känt för alla som varit verksamma de senaste åren i branschen att 40% dist är rent nonsens! Lågnivåbeteendet hos CD-spelare har ju mätts in absurdum av HiFi-tidningarna sedan 1-bitsspelarna introducerades! (dvs se~ dan det blivit mindre intressant att mäta lågnivåegenskaperna ...) jämför man de här siffrorna med de analoga lagringsmedierna så kan *man konstatera* att de inte kan konkurrera med CD-systemet. Att de analoga medierna inte kan konkurrera då det gäller högnivåegenskaper vet väl alla redan.

HUR DET FUNGERAR

Siffror i all ära, men hur kan det vara möjligt att CD-systemet kan återge valfria nivåer mellan sarnplen, och hur kan det vara möjligt att distorsionen kan vara låg, för att inte säga obefintlig vid låga

nivåer? Reklambroschyerna har ju matat oss med bilder på läskigt kantiga signaler som kommer ur CD-spelarna.

Kan det verkligen - hemska tanke - vara så att reklambroschyerna inte duger som kvalificerade läroböcker?

TIDSKONTINUITETEN

Med risk för att bli obegriplig för vissa av läsarna måste jag nu blanda in lite matematik, men bara lite, lite.

Säkert känner alla läsare till att CD-systemet har en begränsad övre gränshfrekvens. Till skillnad från de analoga medierna är alltså den funktion som styr övre gränshfrekvensen oändligt brant, dvs över en viss frekvens finns ingen energi alls. Ungefär på samma sätt som hos örat alltså.

I de analoga medierna är det istället så att energin sjunker i ett okontrollerat eller kontrollerat förlopp över övre gränshfrekvensen. Exempelvis 6 dB/oktav, 12 dB/oktav eller vilket är vanligast - någon odefinierbar funktion.

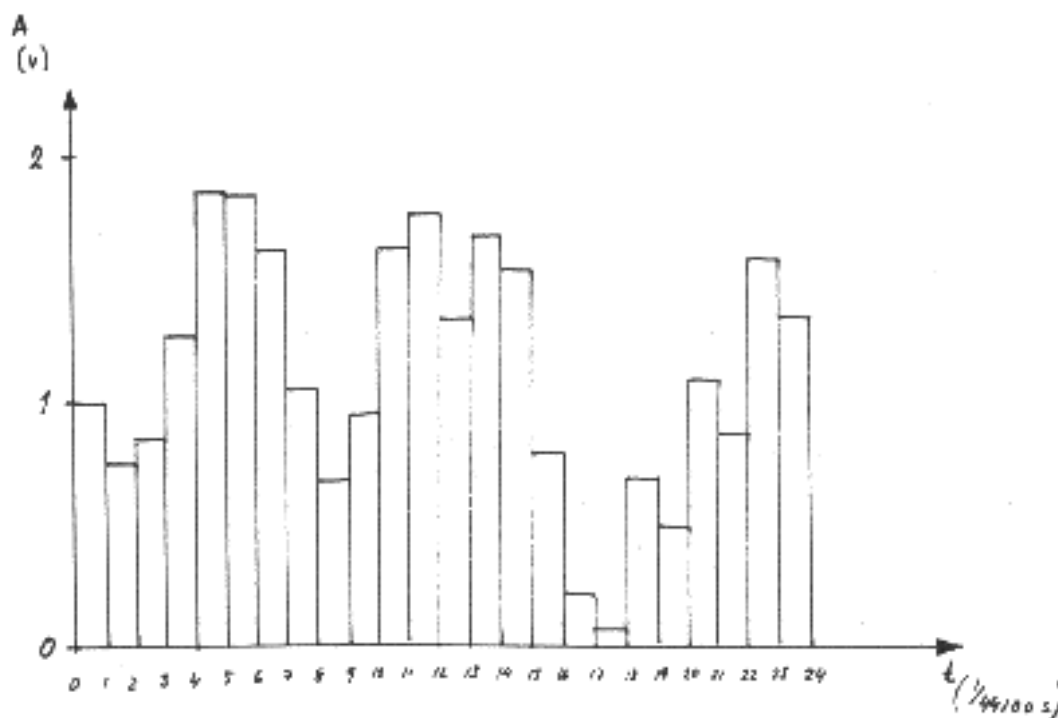


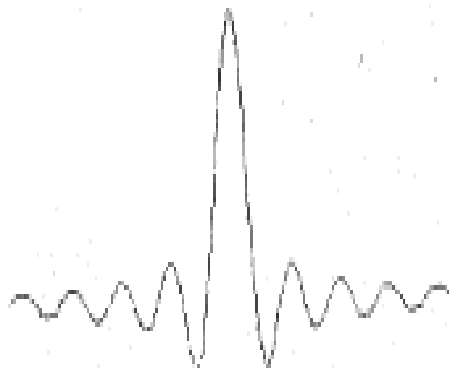
Fig. 2

Om vi tänker oss att signalen från CD-spelaren är uppbyggd av ett antal staplar (se fig 2), vilket ju reklambroschyerna ofta vill få oss att tro, så får vi när vi summerar alla staplarna en signal som ser ganska otrevlig ut. Trappstegsformen beror på att varje stapel har vassa hörn och alltså innehåller frekvenser långt över CD-systemets specifikation. Om man istället tänker sig att varje stapel byts ut mot en stapel med rundade hörn enligt en bestämd funktion kan summan av "staplarna" däremot bli en riktigt trevlig kurvform, utan trappsteg. Denna "stapel" skall ha vissa bestämda egenskaper. Dessa kan kort beskrivas med följande:

1. Kurvformen på den "stapel" som beskriver ett bestämt sample måste ligga på nollamplitud där tidigare och nästkommande staplar skall bestämma amplituden.
2. Faslåget måste vara oförändrat på alla frekvenser inom frekvensbandet som "staplarna" sträcker sig över (0-22,05 kHz), detta innebär att "staplarna" blir symmetrisk i tiden.
3. "Stapelns" topp skall överensstämma med den samplade amplituden.

4. Energiinnehållet hos "Stapeln" (eller pulsen som vi kan kalla den) skall beskriva en brickwallfunktion (se "mängder med allvarliga sakfel" MoLt sommaren 90 och klotterplanksbidraget "Lyssna..." MoLt vintern 90) med en övre gränshfrekvens på 22,05 kHz.

Fig. 3



LÖSNINGEN: SINCEN!

Dessa krav sammantaget ger en puls med utseendet enligt fig.3. Den beskrivs av den matematiska funktionen $\text{SIN}(X)/X$ där X är en tidsvariabel som utgår ifrån samplingsögonblicket ($X=0$) och tilltagen med $t(s) \cdot f_s(44,1 \text{ khz}) \cdot n$ Radianer. Funktionen brukar kallas för en sinc. Så gott som samtliga CD-spelare på marknaden idag (det enda undantag jag kan komma på är den amerikanska 'Wadian) arbetar med denna funktion som grund. Kontentan av detta skall jag försöka belysa med ett par exempel.

HUR VI VISAR TIDSKONTINUITETEN

Vi tänker oss att vi har en elektrisk insignal i form av en enhetspuls (en oändligt kort, oändligt hög puls med arean 1) som vi ska transportera genom vårt digitala system för att utröna om det digitala systemet verkligen är tidskontinuerligt.

I det första fallet tänker vi oss att pulsen kommer mitt på ett sample.

I det andra kommer pulsen mitt emellan två samples.

Exempel 1

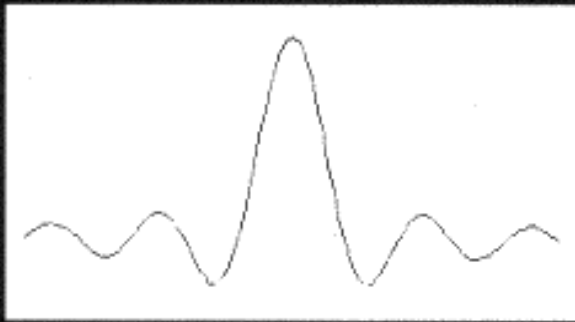


Fig. 4a

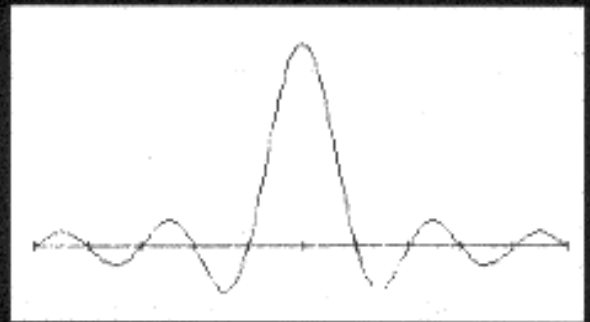


Fig. 4b

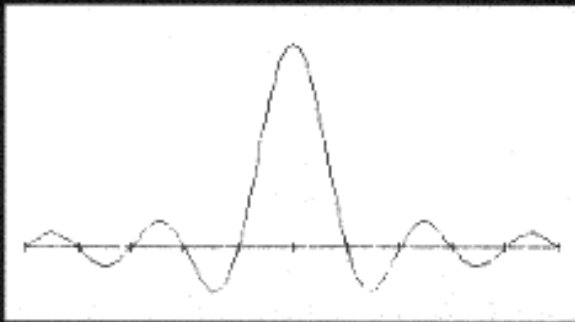


Fig. 4c

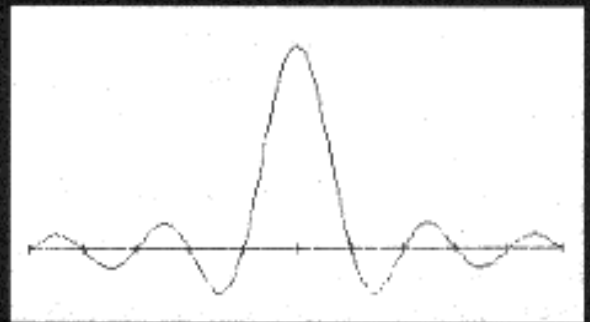


Fig. 4d

Steg 1: Pulsen kommer fram till AD-omvandlarens brickwall-filter och kommer ut som en SINX/X-puls (fig.4a)

Steg 2: SINX/X-pulsen samplas i de punkter som visas i fig.4b.

Steg 3: Den digitala informationen lagras på skiva, skivan spelas, eventuella saknade bitar räknas ut med hjälp av felkorrektionskoderna på skivan och vi har fått tillbaka vår ursprungliga digitala information.

Steg 4: Den digitala informationen omräknas till ett kontinuerligt flöde som består av summan av ett antal nya SINX/X-pulser, en för varje sample (se fig.4c). Som synes i figuren finns det endast ett sample som bär information, nämligen det som togs på pulsens topp.

Resultatet blir alltså en puls som är identisk med den som föregick AD-omvandlingen (dvs en puls identisk med den ursprungliga insignalen bortsett ifrån att frekvensregistret över 22,05 kHz är bortfiltrerat). Se fig.4d.

Steg 5: Från detta kontinuerliga flöde väljs ett överantal värden, t.ex. 4 eller 8 ggr fler än de samplade värdena, för att ge en så god kurvform som möjligt ut från DA-omvandlaren som följer härnäst. Genom att använda ett stort överantal mätvärden kommer övertonerna orsakade av rekvantifieringen att hamna högt upp i frekvens, varmed de lätt kan filtreras bort. Dock måste, för att upprätthålla full 16 bits upplösning, antingen DA-omvandlaren i översamplande system ha större upplösning än de 16 bitar som den kodade signalen har, eller också måste noise shaping tillgripas, eftersom amplituden mellan originalsamplerna kan ligga mellan trappstegen på "16-bitstrappan" (se "mängder med allvarliga sakfel" MoLt sommaren -90).

Steg 6: signalen filtreras från rekvantifieringsprodukterna och är därmed återställd till det skick som rådde före AD-omvandlaren! (som för övrigt även gällde matematiskt i den digitala världen mellan AD- och DA-omvandlarna om man accepterar att de samplade värdena faktiskt representerar topphöjden på de sincar som bygger upp musiken)

Härmed har vi alltså visat att en SINX/X-puls som avläses i nollgenomgångarna samt på toppen kan rekonstrueras exakt, både till formen (med 16 bitars precision) och i tiden (med en precision bättre än $1 \cdot 10^{-9}$ sekunder (se separat artikel på sid 86).

Exempel 2

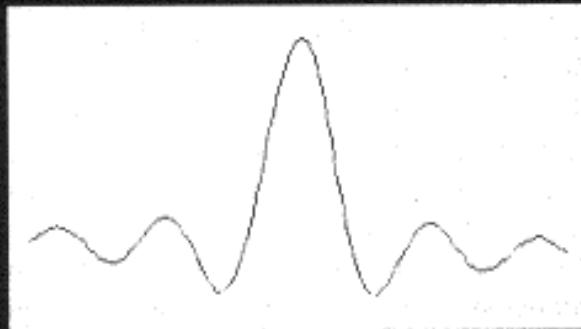


Fig. 5a

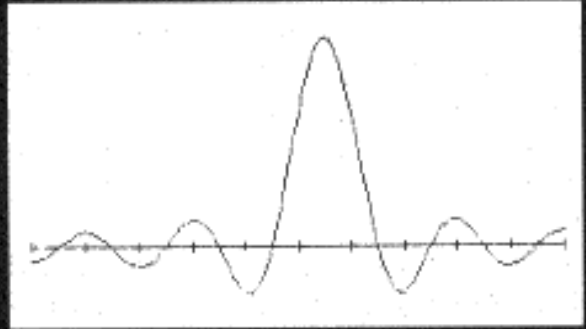


Fig. 5b

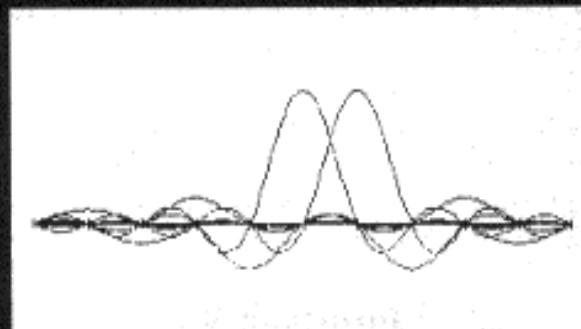


Fig. 5c

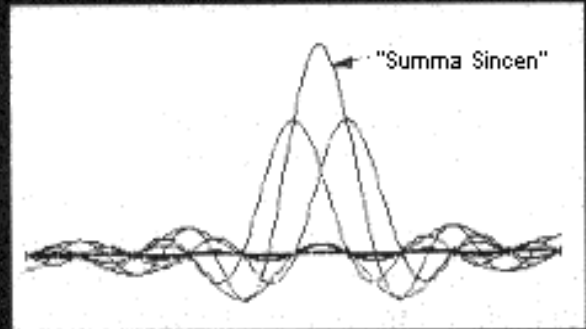


Fig. 5d

Steg I: Som i exempel 1 ovan (se fig.5a).

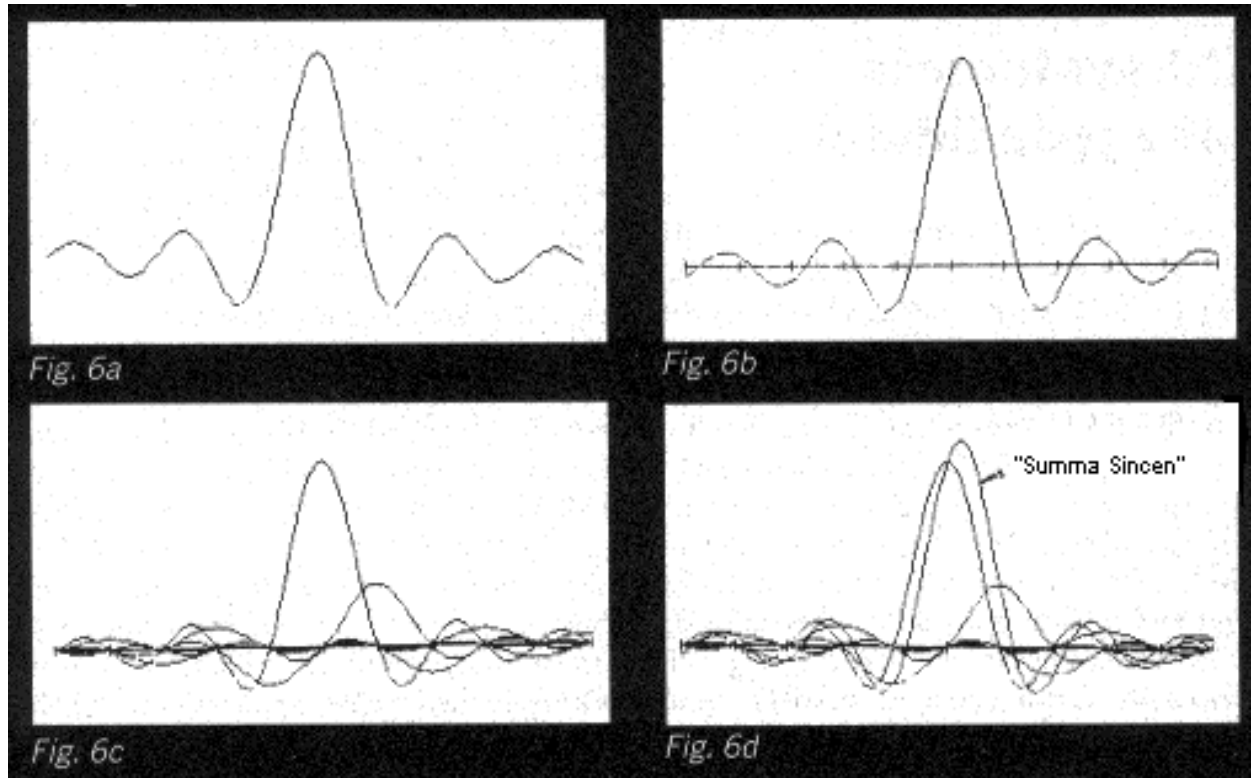
Steg 2: SINX/X -pulsen samplas enligt fig.5b.

Steg 3: Som i exempel 1 ovan.

Steg 4: Den digitala informationen omräknas till ett kontinuerligt flöde som består av summan av ett antal SINX/X -pulser - en för varje sample (se fig.5c). Som synes finns det information i ett stort antal samples (eftersom pulsen som fanns före AD-omvandlingen hade sin topp mitt emellan två samples). Resultatet av summeringen av alla pulser blir emellertid även i detta fall en puls som är identisk med insignalen till AD-omvandlaren, såväl till utseende (med 16 bitars precision) som i tiden (med en precision även här bättre än 1 miljarddels sekund (se nästa sida)!). Se fig.5d.

Steg 5 & 6: Som i exempel 1 ovan.

Vi har alltså visat att det inte är något problem att reproducera en puls som förekom mitt emellan två samples! Samma sak gäller alla pulser, oavsett var i tiden de kommer. I fig.6a-c är pulsrekonstruktionen visad för en puls som kommer precis efter ett sample (5,7 mikrosekunder). Som synes hamnar pulsen rätt i tiden här också, även om figuren blir lite oöverskådlig då förloppen inte sker symmetriskt.



ALLA SIGNALER BEHANDLAS I GRUNDEN LIKA

Med samma metod som använts i de båda exemplen ovan kan man visa att alla signaler, pulser eller statiska signaler, var dorn än förekommer i tiden (i förhållande till samplingsögonblicken) alltid kommer att reproduceras i exakt rätt tid (se artikeln här bredvid)!

Detta beror på att alla musiks signaler med frekvensomfång upp till 22,05 kHz i själva verket kan beskrivas av en löpande serie SINX/X -pulser med varierande storlek, som avbyter varandra med 44,1 kHz.

LITEN JÄMFÖRELSE MED ANALOGA SYSTEM

Varje jämförelse med analoga bandupptagningar och vinylspelare blir självklart parodisk då bara svajet i en dylik kedja ger tidsfel som är åtminstone 1000 ggr större!

Där kan det möjligtvis vara tal om att ha gjort hamburgare av oxfilén...

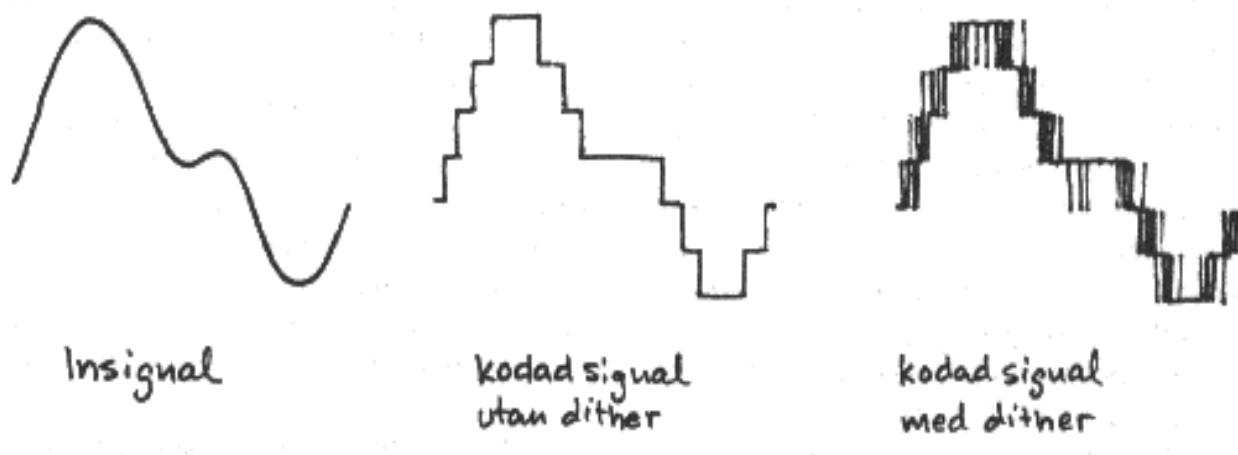
OCH SÅ VAR DET DET HÄR MED AMPLITUDEN...

Av reklambroschyrerna har vi lärt oss att det bara går att koda 65.536 nivåer. Alla nivåer däremellan kommer att hamna på något av de 65.536 trappstegen. Detta är faktiskt nästan sant! Men det betyder inte vad man kanske kan tro för musiks signalen. Saken är nämligen den att om det kommer två helt oberoende signaler (t.ex. sinustoner) samtidigt till AD-omvandlaren så går det inte längre att, genom att bara titta på den ena, förutsäga hur "distorsionen" från AD-omvandlaren kommer att se ut.

Distorsionskomponenterna kan sägas ha förlorat sin strikt harmoniska karaktär. Distorsionen utgörs inte längre av vanliga övertoner till de enskilda sinustonerna, utan är någon typ av blandning som fördelar sig på flera frekvenser, på ett helt annat sätt än intermodulationen i ett analogt system, eftersom olinjäriteterna i det digitala systemet inskränker sig till 65.536 diskreta diskontinuiteter. Den enkelt beskrivbara begränsade upplösningen i ett PCM-system drabbar alltså bara "ensamma toner".

DITHERBRUSET

Om man istället för två sinustoner tänker sig att man blandar ett brus och en sinuston med varandra så händer det lustiga att även distorsionskomponenterna blir blandprodukter av bruset och sinustonen. Eftersom en brusignal redan från början är stokastisk (slumpartad) medför det att alla framblandade distorsioner mellan bruset och sinustonen under AD-omvandlingsprocessen är nya brus signaler! Enda kravet är att brusets amplitud måste vara tillräckligt stor för att "läka ihop" trappstegen. I praktiken ca 1165.536 av full amplitud.



Här ser vi hur en nyttosignal (c:a 8 ms lång), tex en musiksignal, kodas i ett 16-bitars system utan respektive med ditherbrus trots \sin/x algoritmen får en kantig form till följd av det begränsade antalet steg (7 st) vid denna låga nivå (c:a -80 dB). Den minsta "detaljen" i denna figur som är lätt synlig ligger på c:a -108 dB (knycket ungefär mitt på kurvan). Utan ditherbrus missas denna information helt. Med brus kommer den med, även om den synliga brusmängden gör signalen svårare att höra eller mäta jämfört med den helt brusfria signalen, precis som med vilken brusig signal som helst. Pga brusets lite speciella fasegenskaper och samplingsprocessen ser den samplade signalen med ditherbrus lite annorlunda ut än insignalen skulle gjort med adderat vitt brus. De låter dock precis likadant, och faktiskt kan en sekvens ditherbrus teoretiskt råka förekomma i "vanligt" vitt brus. Man skulle kunna säga att ditherbruset är en specialtyp av vitt brus som är speciellt lämplig tillsammans med samplingsprocessen.

DISTORSION BYTS MOT BRUS

Karaktären påverkas alltså inte längre alls av sinustonen, eftersom denna inte kan göra det tillräckligt stora bruset mer stokastiskt, sett ur PCM-systemets synvinkel. Även blandprodukterna (bruset) blir därför alltid stokastiska, alltså ej signalrelaterade, oavsett hur vår nyttomusik-signal ser ut.

Naturligtvis kan man anmärka att även ett brus är en störning, om än harmlösare än signalrelaterade störningar (distorsion). Men så har väl heller ingen sagt att CDsystemet skulle vara absolut brusfritt (utom i reklarnbroschyerna då förstås).

Å andra sidan är ett brusavstånd på 95 dB inte fy skam. Helt klart är det ofantligt mycket bättre än vad analoga lagringssystem kan erbjuda utan hjälp av brusreduceringssystem.

KORT OM BRUSREDUCERINGSSYSTEM

Om brusreduceringssystem bör man nämna att de faktiskt skapar signalrelaterad distorsion! Inte nödvändigtvis på det sätt man är van vid kanske - i form av övertoner till musiken - men i form av ett brus som stiger då musiken är starkare. De intelligentaste brusreduceringssystemen ser förvisso till att det stigande bruset göms så väl som möjligt bakom musiken genom att musik och brus ligger nära varandra i frekvens, men i CD-systemet är bruset istället helt oberoende av signalen. Detta gör självklart att signalen maskeras ofantligt mycket mindre, eftersom den slipper varje form av beslöjande brussvans (vilket dock drabbar bitstreamspelare i diskantområdet).

YTTERLIGARE EN LITEN JÄMFÖRELSE MED ANALOGA SYSTEM

Ska man ge sig till att göra en jämförelse mellan digitala och analoga lagringssystemers amplitudegenskaper, på liknande sätt som gjordes i tidhänseende tidigare i artikeln, så får man det lite svårare. Detta beror framför allt på att det är så stora skillnader mellan olika analoga lagringssystem. Men man kan nog säga att de allra bästa analogsystemen kommer ned i liknande amplitudfel som digitala system så länge man håller sig på riktigt låga nivåer och använder brusreduceringssystem. Okar nivåerna finns det inga analoga system som kommer i närheten av de digitala. I alla analoga lagringssystem släpar musiken med sig mängder av distorsion och brus då nivåerna stiger. Högnivåbeteendet är vanligtvis minst 20 ggr sämre än hos de digitala systemen. Oftast, för att inte säga alltid, är de analoga systemen emellertid drabbade av även andra typer av amplitudfel, nämligen stora förvrängningar av de dynamiska förloppen. Dessa dynamiska förvrängningar är till på köpet ofta kraftigt frekvensberoende. I praktiken innebär detta att systemen får olika frekvensgång vid olika signalnivåer. Låga nivåer blir med de flesta bandspelare både allmänt nivåhöjda och i synnerhet mellanregister-diskanthöjda. Underligt nog verkar det som om många sk "audiofiler" uppskattar dessa förvrängningar som yttar sig i övertydlig detaljåtergivning. En av förklaringarna är säkerligen att de blivit itutade (av sina audiofilpolare) att tydliga detaljer (dvs kompression) är ett typiskt tecken på god dynamik! I de bästa fallen är de analoga systemen ändå tillräckligt bra för att det inte skall handla om några förörat speciellt störande nivåer. Man skulle kunna säga att CD-systemet 'ämfört med de analoga systemen är överkvalificerat, men sådant skadar sällan. Kommentaren "verkligheten låter aldrig något bra" från en av Sveriges största digitalmotståndare, kan kanske vara en plausibel förklaring till att digitalmedierna inte duger för vissa audiofilers öron. Personligen tror jag dock snarare att det beror på att de flesta fonogram än i dag är så illa inspelade, ty verkligheten kan sannerligen låta sprudlande läcker!

ÄR DÅ CD-SYSTEMET PERFEKT?

Nej, självklart inte. Redan har ju ett systemberoende brus nämnts i artikeln. Även om detta är mycket lågt så hör det inte hemma i ett perfekt lagringssystem. Dessutom har CD-systemets begränsade övre gränshäufigens tagits upp i denna artikel. Huruvida detta har betydelse eller inte kan (och bör) naturligtvis diskuteras - helst med vetenskapliga experiment som grund självklart. Ty vi lär inte komma fram till någonting genom att slåss om huruvida det har betydelse eller inte. Som alltid är det bättre att taga reda på hur vår verklighet ser ut. Då slipper 90% av debatten ägnas åt att reda ut alla lösa påståenden från oinitierat håll, istället för att debattera - och experimentellt utreda själva saken. Därmed uppmärksam jag alla som har några vederhäftiga synpunkter i frågan om huruvida CD-systemets övre gränshäufigens om 22,05 kHz är ett problem eller ej, att ta upp dem för debatt i MoLt! Men låt debatten handla om frågeställningar, resultat och slutsatser, och inte om tyckanden.

ALLTSÅ

CD-systemet är oskyldigt till nästan allt det historiskt beskyllts för. Allt fler tycks inse att det, trots att det inte är invändningsfritt, faktiskt är ett riktigt bra system, även om det finns gott om CD-spelare som inte är helt invändningsfria (och så kommer det för övrigt troligen också att vara en lång tid framöver). Men det finns också riktiga guldkorn bland CD-spelarna (och CD-fonogrammen), som kan presentera en ljudåtergivning som analoga system aldrig har kunnat, och troligen även i framtiden kommer att få svårt att konkurrera med. Några antagonister kommer antagligen att vara oförmögna att svälja sin stolthet och i deras värld kommer CD-systemet alltid att vara oanvändbart. För oss andra återstår att glädja oss åt ett ständigt växande utbud av CD i skivaffärerna. Förhoppningsvis ska det inte ta alltför många år innan vi kommit ifatt den civiliserade världens försprång.

Ingvar Öhman